引用格式：张鑫, 李超伦, 李连福. 深海极端环境原位探测技术研究现状与对策. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 932-938.
Zhang X, Li C L, Li L F. *In situ* detection technology for deep sea extreme environment: Research status and strategies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 932-938. (in Chinese)

深海极端环境原位探测技术研究现状与对策

张 鑫[1*]　李超伦[2]　李连福[1]
1 中国科学院海洋研究所 青岛 266071
2 中国科学院南海海洋研究所 广州 510301

摘要　深海极端环境塑造了特殊的生命过程，资源潜力巨大，对其探测与研究是国际地球科学前沿，但深海严苛的高压环境极大地限制了深海采样及探测技术的应用。深海原位探测技术可以在不改变被测物位置及状态的条件下，获取深海样品的组分及含量信息，因此被越来越广泛地应用到深海极端环境的研究工作中。深海极端环境原位探测技术拥有广阔的前景，但作为一种新兴的探测技术仍需解决诸多科学难题。文章总结了国际和国内深海极端环境原位探测技术的研究进展，在分析当前我国深海极端环境研究现状基础上，提出未来我国深海极端环境原位探测技术发展对策。

关键词　深海，极端环境，原位探测，研究现状与对策

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220627003

1 深海极端环境特征及其研究价值

（1）深海环境。深海通常指水深大于 1 000 m 的海域，占全球海洋体积的 75%，是地球上最为重要的极端环境之一，它具有物理上（如温度、辐射、压力等）和化学上（如盐度、pH、氧含量等）的极端。深海环境（也称“深海极端环境”）是由多因子共同塑造的一个统一系统，拥有深海平原、海山、热液、冷泉及海斗深渊等特殊环境，导致海底地形、理化因子的剧烈变化。从地球系统科学的理念来看，深海底部是地球各圈层（岩石圈、水圈、生物圈）之间相互作用，相互依赖和相互影响最为频繁，最为活跃的地区[1,2]。

（2）深海探测技术。深海探测技术是针对有关深

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金（92058206、41822604），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA22050102、XDA19060402）
修改稿收到日期：2022年6月28日

海资源、构成物、现象与特征等资料和数据的采集、分析及显示的技术，是深海开发前期工作的重要技术手段。自20世纪60年代至今，深海探测技术迅速发展。调查船、钻探船、深海探测仪器、无人/载人/遥控深潜器、海底观测网等相继问世，在深海极端环境、地震机理、深海生物和矿产资源，以及海底深部物质与结构等领域取得了一系列重大进展[3]。1872—1876年，英国科学调查船"挑战者"号划时代的科学考察揭开了近代深海大洋调查研究的序幕。但直到近几十年，深海研究才取得革命性的重大突破。如海底扩张与板块学说的提出，从深海钻探计划（DSDP）到大洋钻探计划（ODP）再到综合大洋钻探计划（IODP）的实施，大洋中脊系统与海底热液、冷泉的发现，以及海底矿物资源的勘探与开发等，都对科学和社会的发展起到了重要的作用[1]。

（3）热液。1977年，科学家在东太平洋加拉帕斯裂谷发现了现代热液喷口[4]，以及在温度高达几百度的热液喷口处仍存活的大量生物群落（含细菌、古菌、真菌等），被认为是20世纪后期最显著的科学发现之一。与其相关的资源、环境问题和"黑暗食物链"生命过程也成为当前深海研究的焦点，并取得了一系列成果。

（4）冷泉。冷泉即海底天然气渗漏，它的主要成分包括水、碳氢化合物（甲烷和石油）、硫化氢等化合物，海底冷泉的温度与周边海水温度相近。对深海冷泉生态系统的研究是继20世纪末对热液生态系统研究热潮以来的又一个重要的领域。冷泉区生长着管状蠕虫、蛤类、贻贝类、海星、海胆、海虾、珊瑚等生物。这些生物的体内和体表存在大量的微生物，微生物与宿主之间具有高度相互依赖的共附生关系。冷泉生物具有多种特殊的功能基因和酶，是一种很有潜力的生物资源[5]。

（5）海山。海山是指从海的底部升高1 000 m且没有露出海平面的山。海山所处独特的物理化学环境，造就了其特殊的微生物多样性，成为海洋微生物多样性研究的热点地区。海山具有显著的地理构造和明显的洋流作用，并产生很多物理过程，包含流路变窄致使洋流加速、等温线变形、涡的形成、底部变强成为泰勒柱、内波等。这些物理过程对海山的生物过程具有一定的影响作用[6]。

（6）海斗深渊。海斗深渊是指海洋中水深大于6 000 m的深水区域，是海洋最深的区域，主要由深部海沟组成，也被称为"超深渊"或"海沟"。海斗深渊大约占全球深海区域的1%—2%，但它们却构成了全球海洋深度范围的45%，在海洋生态系统中具有重大意义[7]。1960年，瑞士物理学家雅克·皮卡德和美国海军人员沃尔什，乘深海潜水船下潜到马里亚纳海沟的底部，开启了人类探测海斗深渊的序幕。

2 深海极端环境探测技术及其发展趋势

近年来，对深海热液、冷泉等极端环境近海底区域的基础物理化学环境的观测与分析，尤其是对热液、冷泉喷发流体的地球化学性质的分析，成为揭示深海热液与冷泉活动成因、演化过程，以及对周围大洋环境影响的重要研究内容。由于科学目标的牵引，深海热液、冷泉流体的探测技术成为了深海探测领域的研究热点。

2.1 传统深海极端环境探测技术的不足

当前，对深海热液、冷泉喷口区流体地球化学参数的准确探测仍存在困难。先取样后实验室分析的传统探测方法存在诸多缺陷，例如：深海热液、冷泉流体样品中的溶解气体会随着温度、压力等环境参数的改变而迅速逃逸，使得实验室分析结果远低于其真实浓度。即使是采用较为先进的保压采样技术也不可避免温度变化和持续不断的微生物反应等因素对后续实验室分析结果的干扰，无法获取热液、冷泉喷出流体中各组分的真实浓度，因而无法准确评估热液与冷泉系统流固界面跨圈层物质能量交换对岩石圈演化和海

洋深层环流等动力过程的影响。

目前开展的绝大部分热液、冷泉喷出流体中离子、溶解气体浓度的研究是基于流体保压取样探测的结果。周围海水对保真流体的污染会造成流体中离子、气体浓度探测结果的严重失准。同时，由于水下潜器平台负载限制，保真流体采样器上携带的采样瓶数量有限，较低的采样成功率大大影响到对深海热液、冷泉区喷发流体的探测效率。保压流体取样的探测必然经过样品前处理和实验室的各种测试流程，而在样品处理和测试过程中避免光照，以及与空气接触是十分困难的。例如，对 H_2S 等强还原性气体而言，在分样固定处理过程中极易与空气中的氧气接触而发生化学反应，从而影响到喷口流体中 H_2S 气体浓度的准确测定。因环境改变所带来的测量误差造成传统保压取样方式探测的结果比热液流体的原位探测浓度低了 3—5 倍。

2.2 国内外深海极端环境探测技术发展现状

2.2.1 国外情况

（1）深海原位探测装置。针对传统方式在深海热液、冷泉系统释放气体探测中面临的技术难题，国外多家机构研发了针对深海溶解气体的原位探测装置。市场上已有商品化海洋化学传感器，例如挪威 Kongsberg 集团开发的系列 CO_2、CH_4 传感器。但是，此类化学传感器的高温耐受性差（一般在 40℃ 以下）、探测量程有限，同时对被测水体的环境要求较高，无法应用到热液喷口高温、强腐蚀、复杂颗粒物的流体环境中，也无法应用到冷泉喷口高 CH_4 浓度的流体环境中。美国明尼苏达大学研发了用于探测高温热液喷口流体 H_2S 浓度、H_2 浓度、pH 等参数的电化学传感器，获得了洋中脊和胡安·德富卡板块热液区高温热液流体的原位探测数据[8]。美国哈佛大学等利用原位质谱分析仪对热液流体进行了定量探测，并利用原位数据研究了热液区的微生物作用[9]。美国蒙特雷湾水族馆研究所率先将激光拉曼光谱测量技术应用到深海，于 2004 年研发出世界上第一台可应用于深海原位测量的激光拉曼光谱探测系统——深海原位激光拉曼光谱仪（DORISS），并在海洋酸化、气体溶解速率测量、甲烷水合物结构、沉积物孔隙水等关键科学问题研究上取得了一系列进展[10]。德国柏林科技大学设计了一套可用于水下测量的表面增强激光拉曼光谱测量系统，并将其用于水中多环芳烃的探测。

（2）海底观测网络。美国、加拿大、日本等老牌海洋强国凭借在海洋领域的先发优势，纷纷投入巨资构建海底观测网络，以期实现海底到海面全天候、长期、连续、综合、实时、原位观测。加拿大组建了加拿大海底观测网（ONC），美国启动海洋观测网（OOI）建设，欧洲构建了多学科海底及水体观测系统（EMSO），日本建设了地震和海啸海底观测密集网络（DONET）、DONET 2、日本海沟海底地震海啸观测网（S-net）等海底观测网络[11-13]。

2.2.2 国内情况

（1）深海原位探测装置。我国在“十一五”期间依托“863”计划启动了深海原位激光拉曼光谱探测系统的开发工作。中国海洋大学团队研发了国内首套深海自容式激光拉曼光谱（DOCARS）探测系统，中国科学院海洋研究所团队开发了拉曼光谱插入式探针（RiP）测量系统[14]。中国科学院大连化学物理研究所团队研发了国际上首台以紫外激光作为激发光源的深海拉曼光谱仪，成功通过了在马里亚纳海沟进行的 7000 m 海试验证，创造了原位拉曼光谱的最大工作水深记录[15]。为解决深、远海长时间序列的海底原位观测技术难题，中国科学院海洋研究所研制了“海洋之眼”深海着陆器和深海长期多通道拉曼光谱原位探测系统，实现了对冷泉生物群落、天然气水合物、还原性沉积物、自生碳酸盐岩等不同位置的长期定点原位拉曼探测。中国科学院沈阳自动化研究所研制了“天涯”“海角”及“万泉”3个型号的深渊着陆器，以及深海生态过程长期定点观测系统“冷泉”号着陆

器，突破了多传感器同步观测和长期观测能源分配优化策略等技术，实现了对海斗深渊、冷泉等深海极端环境生物、化学过程的长期定点原位观测[16]。中国科学院深海科学与工程研究所研制了深海原位实验室搭载有多套高性能传感探测设备，包括深海微电子机械系统（MEMS）气相色谱仪、深海光谱仪、深海质谱仪等，于2022年5月成功完成了海试任务，并获取了南海冷泉生态系统流体组分、微生物群落等的72小时原位观测数据。

（2）海底观测网络。“十一五”期间，在“863”计划的资助下，同济大学等高校开展了海底长期观测网络试验节点关键技术研究。“十二五”期间，中国科学院南海海洋研究所、中国科学院声学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所联合研制了“南海海底观测实验示范网”。2012年，在“863”计划的支持下，由中国科学院声学研究所牵头，正式启动了“海底观测网试验系统”建设，分别在我国南海和东海建设海底观测网试验系统[11,12]。

（3）水下运载平台。“工欲善其事，必先利其器”，缺乏可进行深海科考的水下运载平台一直是限制我国深海探测与资源开发的重要原因。在“863”计划的支持下，中船重工集团公司七〇二所、中国科学院声学研究所和中国科学院沈阳自动化研究所等单位联合攻关，开始了7 000 m级载人潜水器（“蛟龙”号）的研制工作。2012年，“蛟龙号”在马里亚纳海沟创造了7 062 m的中国载人深潜纪录[17]。“十二五”期间，我国又启动了“深海勇士”号的研制。“十三五”期间，启动了“奋斗者”号全海深载人潜水器及其关键技术的研制工作。2020年，“奋斗者”号成功下潜10 909 m，创造了我国载人深潜的新纪录[18]。除载人潜水器外，国内多家科研机构开展了水下无人运载平台的研制工作，中国科学院沈阳自动化研究所研制了“海翼”水下滑翔机、“潜龙”系列和“探索”系列深海自主无人潜水器、“海星”系列遥控无人潜水器、“海斗一号”全海深无人潜水器等一系列水下无人运载平台[19-21]。上海交通大学研制了“海龙”系列遥控无人潜水器，中国地质调查局广州海洋地质调查局研制了“海马”遥控无人潜水器等[22]。

2.3 深海极端环境探测技术的需求及其发展趋势

（1）需求。深海极端环境的物理、化学、生物过程特殊，其原位探测技术研究涉及深海装备研发、技术体系建立、综合探测平台建设，是一个科学与技术紧密结合的研究领域。正是因为深海极端环境的复杂性，获取深海物理、化学、生物等过程的高精度数据依赖于研发适于深海极端环境的高灵敏度、高稳定性、长时序的声、光、电、磁、热原位探测或分析技术。

（2）趋势。国际上深海极端环境原位探测技术研究的发展趋势可以归纳为：① 体系化，基于体系化建设的深海极端环境原位探测技术有助于获取多学科、多尺度、立体化和长时序的深海探测数据；② 协同化，利用人工智能、环境感知和通信控制等新兴技术使原位探测装备协同化作业，可以提高原位探测的效率，降低深海极端环境探测成本；③ 智能化，虚拟代理、决策管理、深度学习和生物特征识别等人工智能技术与深海极端环境原位探测技术相结合。

3 我国深海极端环境原位探测技术发展对策

近些年，我国在深海极端环境原位观测技术的研制上取得了相当亮眼的成果，得到了国际同行的高度认可。目前，我国已形成了深海极端环境短时原位探测与长时连续监测相结合的新局面，已初步满足获取深海热液、冷泉等极端环境水体、喷发流体、沉积物等研究对象化学场参数和开展深海极端环境原位实验的需要；但深海极端环境原位探测技术研究仍处于起步阶段，仍有很多技术问题制约该领域的发展。深海原位观测技术领域需要解决的技术问题主要有3个：

① 测量参数少、测量效率较低；② 测量精度差、测量量程较窄；③ 海底原位观测设备的环境适应性较差。针对当前国际深海领域的研究现状与发展趋势，围绕深海研究的特点，补齐我国在深海极端环境原位探测领域的短板，才能在竞争激烈的国际深海极端环境前沿科学研究领域占得一席之地。本文具体提出以下 4 点建议。

（1）提高深海研究支撑平台能力。提高遥控无人潜水器、载人潜水器、自主无人潜水器等水下运载平台的载重、稳定性和作业精度，丰富电力、网络、液压接口类型，改善深海运载平台的深海极端环境适应能力。提升海洋模拟设施的深海模拟能力，提高其运行管理水平，丰富深海极端环境模拟场景，从深海极端环境研究科学问题出发，做到深海原位探测与室内模拟的紧密结合。

（2）加快推进深海长期实验平台建设。新型深海装备与技术是推动深海研究突破的重要动力，开展海底长期实验是未来深海科学发展的一大趋势。因此，当前应加快推进深海移动工作站、深海空间站、深海实验室等新一代海洋实验平台建设，以及深海空间站配套保障船和水下运载器的研发，加强基于深海实验平台开展长期原位探测和深海原位实验技术体系建设。

（3）提升深海原位探测装置性能。当前的深海原位拉曼光谱仪、激光诱导击穿光谱仪、质谱仪等设备取得了较好的科学应用，但其对于部分检测物的检出限仍然较高，同时对极端环境的适应性仍然不够。未来应从设备的性能指标出发，着重提高设备的检测精度、稳定性和适应能力；从研制高密度电池、原位发电技术、智能控制系统、防附着系统角度提高深海着陆器平台的工作时长和稳定性。

（4）优化资源配置模式和管理体制。加强海洋相关的科学研究单位与传统运载平台和观测设备研制单位间合作，针对深海极端环境观测场景和科学问题，研制特殊功能的搭载平台和原位探测设备，提高技术体系研发效率；鼓励国内海底原位观测技术团队开展国际合作，共同开发深海原位观测设备和观测技术，提升我国在深海原位观测技术领域的国际影响力，引领国际深海极端环境科学研究的发展。

参考文献

1 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱. 科技导报, 2021, 39(3): 71-79.
Wang P X. Developing deep-sea science and technology: Perspectives and pitfalls. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 71-79. (in Chinese)

2 李超伦, 李富超. 深海极端环境与生命过程研究现状与对策. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1302-1307.
Li C L, Li F C. Extreme environment and life process in deep-sea: Research status and strategies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1302-1307. (in Chinese)

3 丁忠军, 任玉刚, 张奕, 等. 深海探测技术研发和展望. 海洋开发与管理, 2019, 36(4): 71-77.
Ding Z J, Ren Y G, Zhang Y, et al. Research and prospect of deep-sea detection technology. Ocean Development and Management, 2019, 36(4): 71-77. (in Chinese)

4 Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. Science, 1979, 203: 1073-1083.

5 Kiel S, Little C T. Cold-seep mollusks are older than the general marine mollusk fauna. Science, 2006, 313: 1429-1431.

6 Polzin K L, Toole J M, Ledwell J R, et al. Spatial variability of turbulent mixing in the abyssal ocean. Science, 1997, 276: 93-96.

7 Wolff T. The hadal community, an introduction. Deep Sea Research, 1953, 6: 95-124.

8 Ding K, Seyfried J W E. Direct pH measurement of NaCl-bearing fluid with an *in situ* sensor at 400℃ and 40 megapascals. Science, 1996, 272: 1634-1636.

9 Wankel S D, Germanovich L N, Lilley M D, et al. Influence of subsurface biosphere on geochemical fluxes from diffuse hydrothermal fluids. Nature Geoscience, 2011, 4(7): 461-468.

10 Brewer P G, Malby G, Pasteris J D, et al. Development of a

laser Raman spectrometer for deep-ocean science. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2004, 51(5): 739-753.

11 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321-330.
Li F H, Lu Y G, Wang H B, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330. (in Chinese)

12 李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 海底观测网技术进展与发展趋势. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 33-35.
Li F H, Guo Y G, Wu L X, et al. Technological progress and development trend of ocean bottom observatory network. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 33-35. (in Chinese)

13 李德威, 丁忠军, 景春雷, 等. 国际海底观测网络的发展及现状. 海洋开发与管理, 2020, 37(11): 13-18.
Li D W, Ding Z J, Jing C L, et al. Present status and development of international seafloor observatory network. Ocean Development and Management, 2020, 37(11): 13-18. (in Chinese)

14 Zhang X, Du Z, Zheng R, et al. Development of a new deep-sea hybrid Raman insertion probe and its application to the geochemistry of hydrothermal vent and cold seep fluids. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2017, 123: 1-12.

15 杜增丰, 张鑫, 郑荣儿. 拉曼光谱技术在深海原位探测中的研究进展. 大气与环境光学学报, 2020, 15(1): 2-12.
Du Z F, Zhang X, Zheng R E. Research progress and prospect of laser Raman spectroscopy for *in-situ* detection in deep ocean. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(1): 2-12. (in Chinese)

16 陈俊, 张奇峰, 李俊, 等. 深渊着陆器技术研究及马里亚纳海沟科考应用. 海洋技术学报, 2017, 36(1): 63-69.
Chen J, Zhang Q F, Li J, et al. Research on the application of the hadal lander technology in the Mariana Trench. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(1): 63-69. (in Chinese)

17 徐艺南, 叶聪, 王帅, 等. 蛟龙号载人潜水器在大洋勘探中的发展回顾与展望. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2738-2745.
Xu Q N, Ye C, Wang S, et al. Development review and prospect of Jiaolong manned submersible in ocean exploration. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2738-2745. (in Chinese)

18 杨波, 刘烨瑶, 廖佳伟. 载人潜水器——面向深海科考和海洋资源开发利用的“国之重器”. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 622-631.
Yang B, Liu Y Y, Liao J W. Manned submersibles—Deep-sea scientific research and exploitation of marine resources. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 622-631. (in Chinese)

19 刁宏伟, 李宗吉, 王世哲, 等. 水下滑翔机研究现状及发展趋势. 舰船科学技术, 2022, 44(6): 8-12.
Diao H W, Li Z J, Wang S Z, et al. The research status and development trend of underwater glider. Ship Science and Technology, 2022, 44(6): 8-12. (in Chinese)

20 刘雁集, 杨勇, 张桂臣. 水下滑翔机及其应用技术发展. 船舶工程, 2021, 43(9): 14-21.
Liu Y J, Yang Y, Zhang G C. Underwater glider and its application technology development. Ship Engineering, 2021, 43(9): 14-21. (in Chinese)

21 戴天娇. 中国无人潜水器跨入深渊和极地科考新阶段. 科学, 2021, 73(6): 39.
Dai T J. Chinese unmanned submersible enters new phase of abyssal and polar scientific research. Science Magazine, 2021, 73(6): 39. (in Chinese)

22 曹俊, 胡震, 刘涛, 等. 深海潜水器装备体系现状及发展分析. 中国造船, 2020, 61(1): 204-218.
Cao J, Hu Z, Liu T, et al. Current situation and development of deep-sea submersible equipment. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 204-218. (in Chinese)

In situ Detection Technology for Deep Sea Extreme Environment: Research Status and Strategies

ZHANG Xin[1*] LI Chaolun[2] LI Lianfu[1]

（1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China）

Abstract The extreme environment of the deep sea has shaped special life processes with great resource potential, and its detection and research are the frontier of international earth science. While the harsh high-pressure environment of the deep sea greatly limits the application of deep-sea sampling and detection technology, the deep-sea *in situ* detection technology can obtain the component and content information of deep-sea samples without changing the location and state of the measured object, hence it is more and more widely used in the research of deep-sea extreme environment. The deep-sea extreme environment *in situ* detection technology has a broad prospect. However, as an emerging detection technology, many scientific problems still need to be solved. This study summarizes the international and domestic research progress of deep-sea extreme environment *in situ* detection technology, and puts forward the future development strategies for the research of deep-sea extreme environment *in situ* detection technology in China.

Keywords deep-sea, extreme environment, *in situ* detection, research status and strategies



张 鑫 中国科学院海洋研究所研究员。国家优秀青年科学基金获得者，主要从事深海原位探测技术和方法研究，作为第一完成人研制了世界首台高温热液流体拉曼光谱原位探测系统。主持中国科学院、科学技术部、国家自然科学基金委员会等单位的10余项重点项目。获得中国科学院青年科学家奖、山东青年五四奖章、中国科学院杰出科技成就奖、中国海洋工程科学技术奖特等奖等。E-mail: xzhang@qdio.ac.cn

ZHANG Xin Professor of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS), and the winner of the Excellent Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China. Prof. Zhang mainly focuses on the study of deep-sea *in situ* detection technologies. As the major contributor, he developed the *in situ* Raman insertion Probe (RiP) system, which is the first *in situ* Raman detection system suitable to high-temperature hydrothermal fluid environment in the world. In recent years, he has undertaken more than 10 major projects sponsored by the CAS, Ministry of Science and Technology of China, National Natural Science Foundation of China, and so on. He was awarded the CAS Young Scientist Award, the 22nd Shandong Youth May Fourth Medal, Distinguished Scientific Achievement Award of CAS, the Special Award of China Marine Engineering Science and Technology, etc. E-mail: xzhang@qdio.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author